

Influência da presença de adições minerais no comportamento do betão fresco em composições com incorporação de superplastificantes

Aires Camões¹

*Universidade do Minho, Departamento de Engenharia Civil
Azurém, P – 4800-058 Guimarães, Portugal*

RESUMO

De modo a avaliar o efeito em betões frescos da presença de adições minerais no desempenho dos superplastificantes, procedeu-se à realização de um programa experimental. Admitindo que o betão pode ser considerado como um material compósito bifásico, constituído por uma matriz (pasta ligante) e por um material de enchimento (agregados) e que a matriz controla as propriedades reológicas do betão fresco, foram efectuados ensaios no cone de Marsh e ensaios de mini-abaxamento em pastas contendo diferentes dosagens de cimento, cinzas volantes, fíler calcário e dois tipos distintos de superplastificante. Os resultados obtidos nos ensaios referidos indiciam que: a) os dois tipos de ensaios (cone de Marsh e mini-abaxamento) originam, em geral, resultados comparáveis, coincidindo na determinação da quantidade óptima de superplastificante; b) os dois tipos de superplastificante testados demonstraram eficiências distintas; c) a presença e o tipo de adição mineral influenciam o comportamento reológico das pastas.

1. INTRODUÇÃO

O efeito dos superplastificantes é influenciado, fundamentalmente, por três fenómenos de natureza físico-química (dispersão, adsorção e potencial de repulsão intermolecular zeta) que resultam na desfloculação e dispersão das partículas de cimento, conferindo-lhes uma forte carga eléctrica negativa de modo a repeli-las umas das outras.

Em geral, a quantidade de superplastificante a incluir numa composição de betão é determinada experimentalmente por intermédio de ensaios em pastas (cimento, água e superplastificante), realizados com o objectivo de determinar a quantidade de superplastificante responsável pela obtenção de uma fluidez máxima da pasta para uma dada relação água/ligante. É, assim, assumido que as características da pasta controlam as propriedades reológicas do betão fresco e que este procedimento assegura que o betão correspondente, constituído por uma pasta semelhante e uma determinada quantidade de agregados, apresenta uma trabalhabilidade máxima. A única variável presente neste processo é a relação superplastificante/cimento e é determinada com recurso a ensaios simples e práticos, como o ensaio do cone de Marsh ou o mini-abaxamento.

O procedimento enunciado encontra-se generalizado e é indicado como válido por vários autores (Carbonari (1996), Aïtcin (1998), Ramachandran *et al* (1998)). Contudo, a

¹ Professor Auxiliar (aires@civil.uminho.pt)

bibliografia existente sobre o assunto apenas contempla betões sem incorporação de adições ou com inclusão de apenas pequenas quantidades, como é o caso da aplicação típica de sílica de fumo em betões de elevado desempenho que, em geral, é de cerca de 10% da massa de cimento. Quando se pretende incluir elevadas percentagens de adições minerais, a seguinte dúvida deverá ser convenientemente esclarecida: a acção de dispersão e desfloculação induzida pelo superplastificante actua apenas nas partículas de cimento ou também afecta as adições minerais, como é o caso das cinzas volantes (adição pozzolânica tipo II) ou do fíler calcário (adição quase inerte tipo I)? Ou seja, a dosagem de superplastificante deverá ser estabelecida em função da quantidade de ligante (cimento + adições) presente na mistura ou apenas da quantidade de cimento?

Neste contexto, foi elaborado um programa experimental com o objectivo de contribuir para o esclarecimento desta questão. Várias pastas constituídas por cimento, diferentes dosagens de superplastificante, quantidades distintas de substituição de cimento por cinzas volantes ou fíler calcário e mantendo a relação água/ligante constante foram fabricadas e submetidas ao ensaio do cone de Marsh e do mini-abaxamento. O efeito do tipo de superplastificante foi, também, avaliado recorrendo à utilização de dois tipos diferentes: um à base de copolímeros de última geração e um à base de naftaleno sulfonado. Os resultados obtidos nos ensaios realizados são aqui apresentados e analisados.

2. MATERIAIS E PROCEDIMENTOS DE ENSAIO

O cimento (CEM) utilizado no fabrico das pastas foi um cimento Portland do tipo CEM I 42.5R. As cinzas volantes (CV) foram fornecidas pela Central Termoeléctrica do Pego e utilizou-se, também, um fíler calcário (FC) de origem nacional.

Na Tabela 1 apresenta-se a composição química do cimento, cinzas volantes e fíler calcário. Os componentes potenciais do cimento, calculados de acordo com as expressões de Bogue (1955), estão incluídos na Tabela 2. Na Tabela 3 é possível observar as principais características físicas dos materiais em pó referidos.

Tabela 1 – Composição química do cimento, das cinzas volantes e do fíler calcário.

Composição química	CEM (%)	CV (%)	FC (%)
SiO ₂	19.71	60.87	–
Al ₂ O ₃	5.41	20.40	< 0.40
Fe ₂ O ₃	3.34	7.82	< 0.03
CaO	61.49	2.72	–
MgO	2.58	1.40	–
SO ₃	3.22	0.22	–
Cl ⁻	0.01	0.00	–
CaCO ₃	–	–	99.00
CaO livre	0.81	0.00	–
Perda ao fogo	2.52	7.30	43.61
Resíduo insolúvel	1.94	–	0.04

Tabela 2 – Componentes potenciais do cimento.

Componente	CEM (%)
C ₃ S	61.61
C ₂ S	4.55
C ₃ A	8.69
C ₄ AF	10.15
C \bar{S}	5.47

Tabela 3 – Propriedades físicas do cimento, das cinzas volantes e do fíler calcário.

Propriedade	CEM	CV	FC
Massa volúmica (kg/m ³)	3150	2360	2700
Superfície específica de Blaine (m ² /kg)	358.4	387.9	–
Finura (%) [$>\mu\text{m}$]	1.7 [>90]	27.3 [>45] 13.2 [>75]	18.0 [>80]
Exigência de água (%)	28.0	29.7	–

A composição química de um dos superplastificantes (SP) é à base de naftaleno formaldeído sulfonado enquanto a do outro é baseada em copolímeros de última geração. As principais características dos superplastificantes apresentam-se na Tabela 4.

Tabela 4 – Principais características dos superplastificantes (CP: copolímero; NS: naftaleno).

Característica	CP	NS
Teor de sólidos (%)	20 \pm 2	40 \pm 2
Densidade relativa [20 °C]	1.05 \pm 0.02	1.2 \pm 0.02
PH	7.0 \pm 1.0	7.1 \pm 0.5
Teor de cloretos (%)	< 0.1	0
Aparência	líquido castanho	líquido castanho

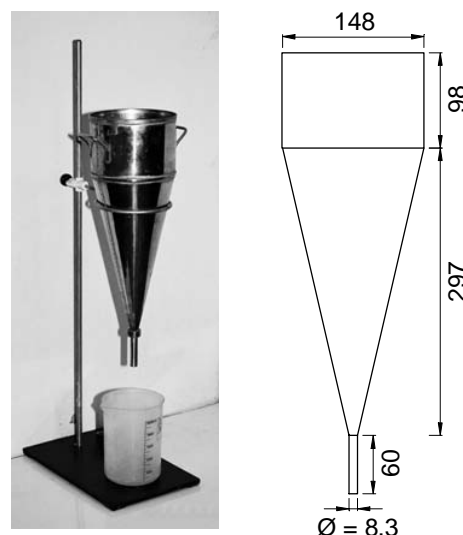


Figura 1 – Cone de Marsh utilizado nos ensaios (dimensões em mm).

Os ensaios no cone de Marsh e de mini-abaixamento são utilizados frequentemente para a determinação do ponto de saturação dos SP (dosagem óptima, a partir da qual não se verificam ganhos relevantes de fluidez) e para avaliar a compatibilidade entre o cimento e o

superplastificante (Aïtcin (1998)). O cone de Marsh utilizado apresenta-se na Figura 1. O ensaio consiste em preencher o cone com 1000 ml de pasta e, em seguida, registrar o tempo necessário para 500 ml de pasta escoarem através do cone. Quanto maior o tempo de escoamento, menor a fluidez das pastas.

Após a realização do ensaio do cone de Marsh, as pastas foram submetidas ao ensaio de mini-abaxamento. Este ensaio requer um molde tronco-cônico com as seguintes dimensões: 57 mm de altura; 19 mm de diâmetro superior; 38 mm de diâmetro inferior. Após o completo enchimento do mini-cone com a pasta a ensaiar, retira-se o molde e mede-se o espalhamento da pasta em dois diâmetros aproximadamente perpendiculares (ver Figura 2). O resultado deste ensaio é a média dos espalhamentos medidos. Quanto maior o espalhamento, maior a fluidez das pastas.



Figura 2 – Ensaio de mini-abaxamento.

Uma vez que o comportamento reológico das pastas depende do tipo, sequência e tempo de amassadura, estes aspectos foram mantidos constantes ao longo de todo o programa experimental. Pretendeu-se, ainda, implementar uma sequência de mistura que garantisse, nesta fase, a obtenção de pastas similares às pastas constituintes de betões, podendo-se considerar que estas pastas simulavam a matriz ligante dos betões correspondentes. Neste estudo, todas as composições foram produzidas num misturador planetário com 5 L de capacidade, dotado de duas velocidades: lenta (60 rpm) e rápida (120 rpm). A seguinte sequência de mistura foi adoptada com base em estudos de Carbonari (1996): primeiro, durante 2 minutos à velocidade lenta, foi misturado o cimento com a água e 1/3 da dosagem de superplastificante prevista; em seguida, foram acrescentadas as adições minerais (cinzas volantes ou fíler calcário) e a pasta foi misturada ao longo de mais 4 minutos à velocidade rápida; numa terceira fase, adicionou-se mais 1/3 de superplastificante e a pasta foi misturada durante mais 2 minutos à velocidade lenta; finalmente, foi adicionado o restante 1/3 de superplastificante e a pasta foi misturada durante mais 2 minutos sujeita à velocidade rápida do misturador.

Com o objectivo de determinar a dosagem óptima do superplastificante para comparar o desempenho dos diferentes superplastificantes ou para avaliar o efeito da incorporação de diferentes quantidades de cinzas volantes ou fíler calcário, prepararam-se várias pastas, que foram sujeitas ao ensaio do cone de Marsh e de mini-abaxamento. Em todas as composições, a relação água/pó ($pó = CEM + CV + FC$) foi mantida constante e igual a 0.945 em volume, que corresponde a uma relação água/pó em massa de 0.30 para a composição de controlo, fabricada sem incorporação de adições. A quantidade de água presente no superplastificante foi devidamente tida em consideração no cálculo da composição das pastas.

O estudo experimental realizado foi dividido em três fases. Primeiro, foram realizados ensaios em pastas contendo cimento, superplastificante à base de copolímeros (CP) e cinzas volantes. Seguidamente, fabricaram-se pastas com cimento, superplastificante à base de naftalenos (NS) e cinzas volantes. Finalmente, foram efectuados ensaios em pastas

constituídas por cimento, superplastificante CP e fíler calcário. As diferentes misturas estudadas apresentam-se na Tabela 5.

Tabela 5 – Composições das pastas estudadas.

CV/(CEM+CV)	FC/(CEM+FC)	CP/(CEM+CV+FC)	NS/(CEM+CV+FC)
0	–	0.15%; 0.25%; 0.50%; 1.0% 2.0% 3.0% 4.0%	–
20%	–		–
40%	–		–
60%	–		–
100%	–		–
–	40%		–
–	100%		–
0	–	–	0.15%; 0.25%; 0.50%; 1.0% 2.0% 3.0% 4.0%
40%	–	–	
100%	–	–	

Conforme se pode constatar por observação da Tabela 5, as variáveis estudadas foram as seguintes: percentagem de substituição de cimento por cinzas volantes (em volume); percentagem de substituição de cimento por fíler calcário (em volume); tipo de superplastificante (CP ou NS); dosagem de sólidos de superplastificante (em volume) em função do volume de pó (CEM + CV + FC).

3. RESULTADOS DOS ENSAIOS DO CONE DE MARSH E DO MINI-ABAIXAMENTO

Os resultados obtidos nos ensaios das pastas no cone de Marsh e de mini-abaixamento apresentam-se nas Figuras 3 e 4. De modo a ter em consideração a influência da densidade das diferentes pastas no tempo de escoamento (fluidos com maior massa volúmica escoam mais rapidamente do que fluidos dotados de parâmetros reológicos semelhantes mas com densidade inferior), os resultados do cone de Marsh foram corrigidos e encontram-se expressos por intermédio de um factor (k_{esc}). Este factor está intimamente relacionado com a viscosidade de pastas newtonianas e torna possível a comparação do comportamento reológico de pastas com diferentes densidades (Camões (2002)). O factor k_{esc} é obtido através do produto do tempo de escoamento verificado no cone de Marsh pela respectiva massa volúmica.

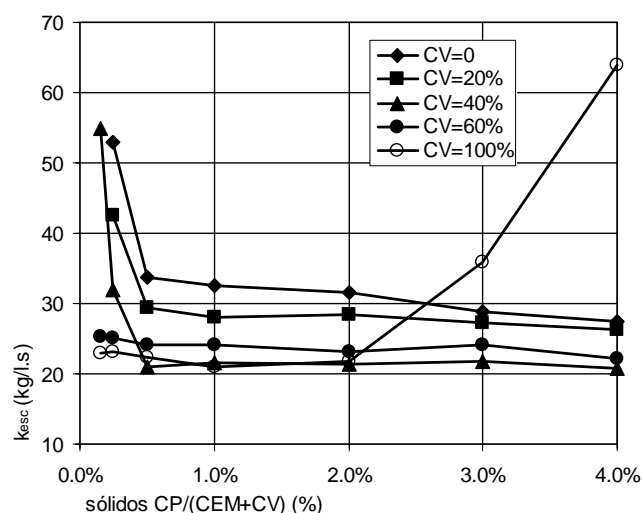


Figura 3 – Resultados do ensaio no cone de Marsh (1ª fase do trabalho experimental).

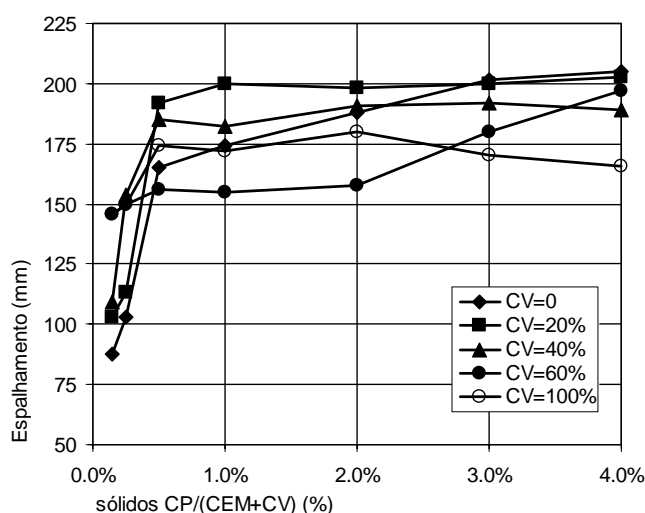


Figura 4 – Resultados do ensaio de mini-abaxamento (1ª fase do trabalho experimental).

Conforme se pode observar nas Figuras 3 e 4, a fluidez das pastas varia marginalmente a partir de determinada dosagem de superplastificante. Este valor, denominado ponto de saturação, pode ser considerado como a quantidade máxima de superplastificante a incluir nas misturas. Comparando os resultados apresentados na Figura 3 com os da Figura 4, verifica-se que em ambos o ponto de saturação coincide e é igual a 0.5%. No entanto, os resultados obtidos com o cone de Marsh parecem ser mais consistentes e mais fáceis de interpretar.

Os resultados obtidos indicam, também, que:

- A presença de cinzas volantes é benéfica, uma vez que aumenta a fluidez das pastas;
- A ação do superplastificante não se confina apenas às partículas de cimento, abrangendo, também, as partículas de cinzas volantes;
- O comportamento reológico das pastas fabricadas com uma percentagem de substituição de cimento por cinzas volantes superior a 60% é diferenciado do das restantes. Para estas pastas, os resultados do cone de Marsh não permitiram identificar a existência de um ponto de saturação do superplastificante e para CV = 100% a fluidez decresceu substancialmente para teores de SP superiores a 2.0%;

- Uma vez que pastas sem superplastificante e com 100% de cinzas volantes não escoam no cone de Marsh, tudo indica que a fluidez máxima das pastas com $CV = 60\%$ e $CV = 100\%$ se obtém com a adição de uma quantidade muito pequena do superplastificante CP utilizado (inferior a 0.15%).

Os resultados obtidos na 2ª fase do programa experimental apresentam-se nas Figuras 5 e 6. Nesta fase, o superplastificante CP foi substituído pelo NS e apenas foram ensaiadas pastas constituídas com 0, 40% e 100% de cimento substituído por cinzas volantes. Por intermédio da realização destes ensaios, constatou-se que pastas dotadas de dosagens de sólidos de superplastificante inferiores a 1.0% não fluíram através do cone de Marsh e apresentavam espalhamentos, medidos no ensaio de mini-abaxamento, marginais. Pastas fabricadas com $CV = 100\%$ também não fluíram através do cone de Marsh e, entre estas, as produzidas com 4.0% de superplastificante também não sofreram espalhamento no ensaio de mini-abaxamento.

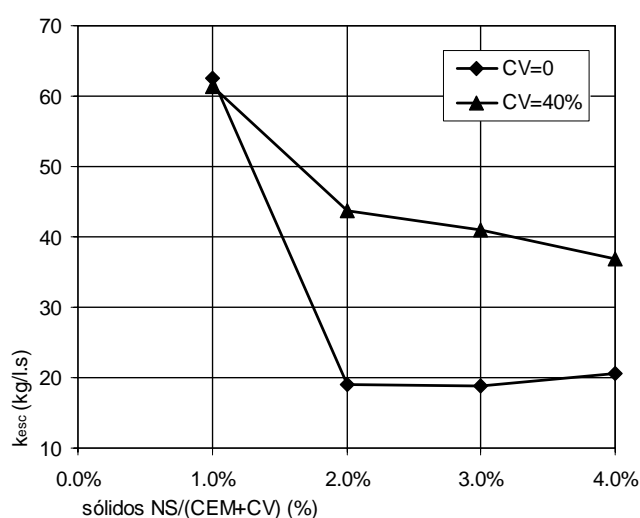


Figura 5 – Resultados do ensaio no cone de Marsh (2ª fase do trabalho experimental).

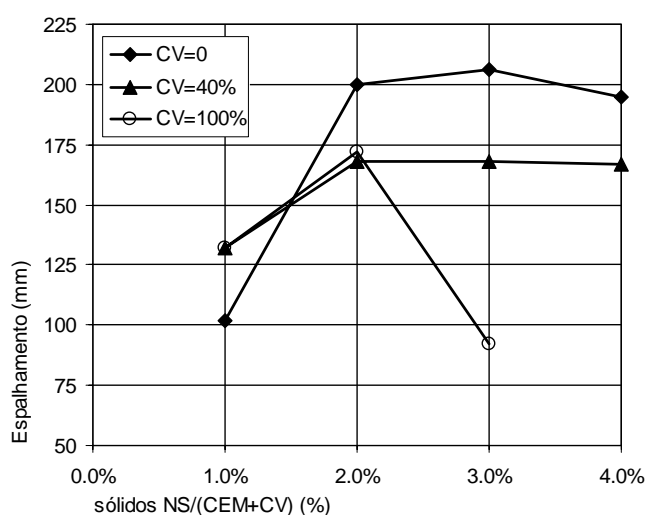


Figura 6 – Resultados do ensaio de mini-abaxamento (2ª fase do trabalho experimental).

Por observação das Figuras 5 e 6, é possível verificar que o ponto de saturação do superplastificante NS é superior ao do CP, determinado anteriormente. Tanto o ensaio com o

cone de Marsh como o mini-abaxamento resultaram na determinação de uma quantidade óptima de superplastificante próxima de 2.0%. Este tipo de superplastificante (NS) aparenta ser menos efectivo nas partículas de cinzas volantes que o CP, uma vez que a incorporação de cinzas volantes em pastas fabricadas com o superplastificante NS diminuiu a fluidez das pastas, ao contrário do verificado anteriormente com o superplastificante CP. No entanto, este tipo de superplastificante, quando adicionado em quantidades próximas do ponto de saturação, revelou-se eficaz em pastas com 100% de cimento, conforme comprova o reduzido k_{esc} determinado, inferior ao obtido na pasta semelhante, fabricada com o superplastificante CP.

Também foram fabricadas e ensaiadas pastas com superplastificante CP e com incorporação de fíler calcário, em substituição de 40% e 100% de cimento. Os resultados apresentam-se nas Figuras 7 e 8.

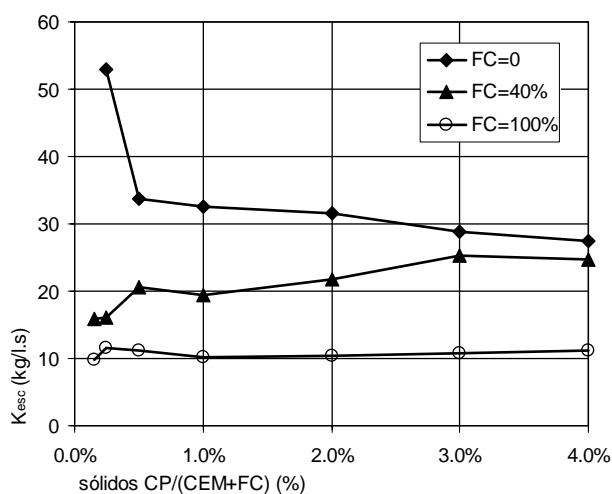


Figura 7 – Resultados do ensaio no cone de Marsh (3ª fase do trabalho experimental).

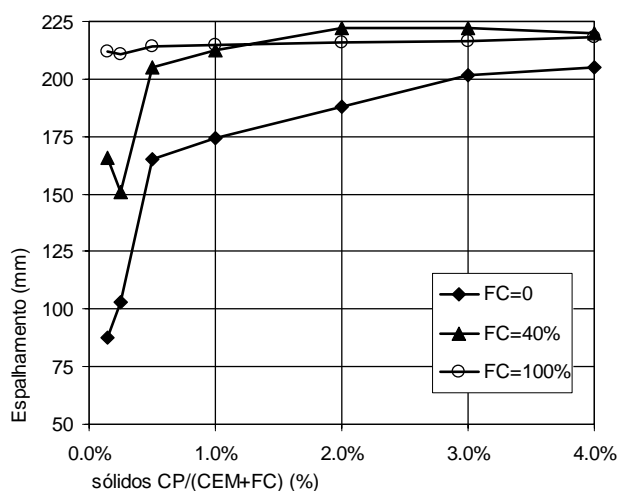


Figura 8 – Resultados do ensaio de mini-abaxamento (3ª fase do trabalho experimental).

Os resultados obtidos nas pastas com incorporação de fíler calcário indicam que:

- A inclusão de fíler calcário aumenta significativamente a fluidez das pastas;
- Aparentemente a acção do superplastificante é, também, efectiva nas partículas de fíler calcário;

- O comportamento reológico das composições fabricadas com fíler calcário é distinto do observado nas restantes;
- O ponto de saturação do superplastificante nas pastas com adição de fíler calcário não é perceptível através da análise dos resultados verificados no cone de Marsh mas, nas pastas com 40% de cimento substituído por fíler calcário, os resultados obtidos com o mini-abaxamento indicam que o ponto de saturação é próximo de 0.5%. No entanto, tal como nas pastas com 100% de cinzas volantes, o escoamento no cone de Marsh só é possível adicionando superplastificante. Assim, parece que, com adição de fíler calcário, a máxima fluidez deve verificar-se para quantidades muito pequenas de superplastificante CP.

4. PERDA DE FLUIDEZ AO LONGO DO TEMPO

O incremento da trabalhabilidade é uma das maiores vantagens associadas à utilização de adjuvantes superplastificantes. Contudo, a duração desta acção é relativamente curta e pode manter-se durante 30 a 60 minutos, findos os quais a acção do superplastificante tende a anular-se (Ramachandran (1998)). Nestas circunstâncias, a perda de fluidez ao longo do tempo das pastas pode ser considerada como um dos parâmetros de estudo mais importantes. O efeito da incorporação de cinzas volantes ou de fíler calcário deverá ser convenientemente avaliado, bem como a influência do tipo de superplastificante (CP ou NS).

Após a realização dos ensaios no cone de Marsh e de mini-abaxamento, as pastas contendo a quantidade óptima de superplastificante (0.5% para o CP e 2.0% para o NS) foram mantidas num recipiente para, posteriormente, serem submetidas novamente ao escoamento no cone de Marsh decorridos 15, 30 e 60 minutos após a adição de água ao cimento no fabrico das pastas. Um minuto antes do início do ensaio, as pastas foram novamente misturadas durante 1 minuto a 60 rpm e, logo depois, mediu-se o tempo de escoamento das mesmas no cone de Marsh.

Os resultados obtidos apresentam-se nas Figuras 9 a 12. Os resultados encontram-se expressos pela percentagem de perda do factor k_{esc} em relação ao seu valor inicial (Δk_{esc}).

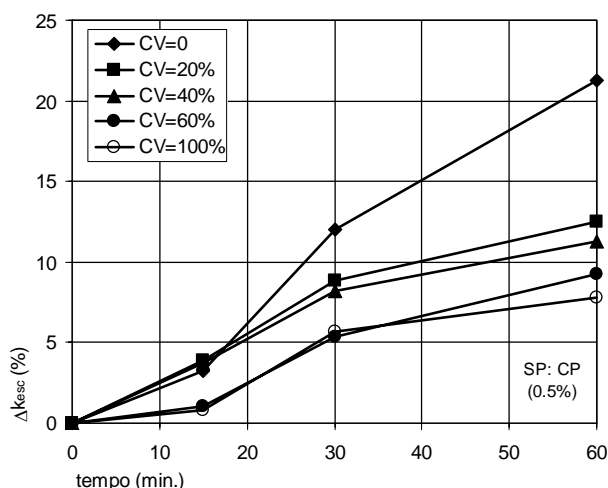


Figura 9 – Perda de fluidez ao longo do tempo de pastas com incorporação de CV fabricadas com uma dosagem óptima de SP CP (0.5%).

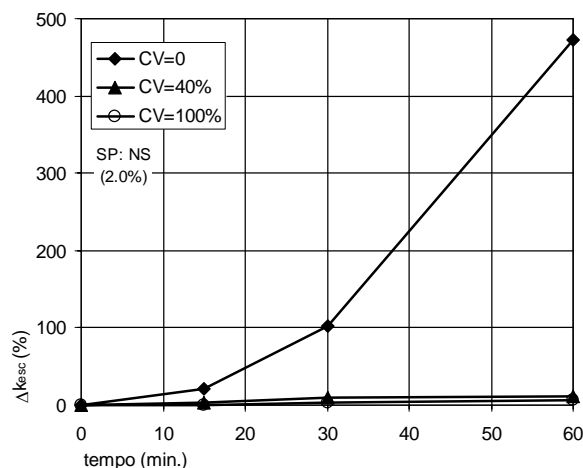


Figura 10 – Perda de fluidez ao longo do tempo de pastas com incorporação de CV fabricadas com uma dosagem ótima de SP NS (2.0%).

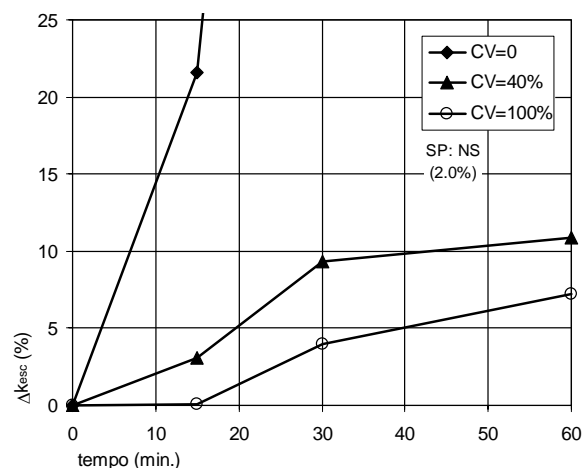


Figura 11 – Perda de fluidez ao longo do tempo de pastas com incorporação de CV fabricadas com uma dosagem ótima de SP NS (2.0%) – pormenor.

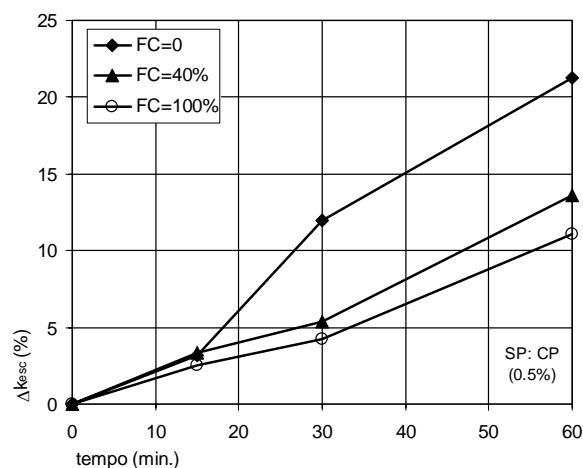


Figura 12 – Perda de fluidez ao longo do tempo de pastas com incorporação de FC fabricadas com uma dosagem ótima de SP CP (0.5%).

Conforme as Figuras 9 a 12 elucidam, a substituição de cimento por cinzas volantes ou por fíler calcário reduz significativamente a perda de fluidez com o tempo, mesmo para as menores percentagens de substituição (20% para as CV e 40% para o FC). A perda de fluidez

ao longo do tempo das pastas fabricadas com superplastificante NS e sem substituição de cimento atingiu valores muito superiores aos verificados quando usado o superplastificante CP. Logo aos 15 minutos, a pasta de cimento e superplastificante NS sofreu uma perda de fluidez de cerca de 22%, tendo este valor sido atingido com superplastificante CP somente ao fim de 60 minutos. Decorridos 30 minutos a perda de fluidez da pasta de cimento com superplastificante NS foi de cerca de 100% e 470% aos 60 minutos. No entanto, nas pastas com CV = 40% a perda de fluidez ao longo do tempo foi semelhante para os dois tipos de superplastificante usados. Este aspecto realça o efeito amplamente favorável da adição de cinzas volantes aquando da utilização do superplastificante NS.

5. CONCLUSÕES

Com base nos resultados obtidos, tudo indica que a quantidade óptima de superplastificante pode ser determinada por intermédio da realização de ensaios expeditos como o cone de Marsh e o mini-abaxamento. No entanto, com o cone de Marsh obtiveram-se resultados de mais fácil interpretação e globalmente mais consistentes.

A inclusão de adições afectou o comportamento reológico das pastas e a dosagem óptima de superplastificante deve ser determinada considerando a sua presença. Ou seja, a quantidade de superplastificante a acrescentar em pastas e betões deve ser referida em relação à quantidade total de pó e não só em função do teor de cimento presente na composição.

A eficácia dos dois superplastificantes testados (CP e NS) foi substancialmente diferente. O ponto de saturação dos sólidos de superplastificante CP foi de cerca de 0.5% do volume total de pó e aproximadamente 2.0% para o superplastificante NS. A fluidez das pastas fabricadas com superplastificante CP foi melhorada com a inclusão e incremento da quantidade de cinzas volantes tendo-se passado exactamente o inverso em pastas contendo superplastificante NS. Assim, a acção do superplastificante CP parece ser mais eficaz nas partículas de cinzas volantes do que o superplastificante NS.

A perda de fluidez ao longo do tempo das pastas diminuiu substancialmente com a presença de adições minerais (cinzas volantes ou fíler calcário). Quanto maior foi a quantidade de cimento substituído por cinzas volantes ou fíler calcário, menor foi a perda de fluidez ao longo do tempo verificada. As pastas de cimento (sem incorporação de adições minerais) e superplastificante NS apresentaram perdas de fluidez ao longo do tempo muito elevadas. Este aspecto não foi verificado em pastas fabricadas com o superplastificante CP. Contudo, com a incorporação de cinzas volantes ou fíler calcário a perda de fluidez com o tempo foi significativamente diminuída, atingindo valores da mesma ordem de grandeza dos verificados com o superplastificante CP.

6. REFERÊNCIAS

Aïtcin, P.-C., *High Performance Concrete*, Modern Concrete Technology 5, E & FN Spon, Londres e Nova Iorque (1998).

Bogue, R.H., *Chemistry of Portland Cement*, Reinhold, New York, USA (1955).

Camões, A., *Betões de Elevado Desempenho com Incorporação de Cinzas Volantes*, Tese de Doutoramento, Universidade do Minho, Guimarães, Portugal (2002).

Carbonari, B.T., A Synthetic Approach for the Experimental Optimization of High Strength Concrete, *4th International Symposium on Utilization of High-Strength / High Performance Concrete*, Paris, França, 161-167 (1996).

Ramachandran, V.S., Malhotra, V.M., Jolicoeur, S. e Spiratos, N., *Superplasticizers: Properties and Applications in Concrete*, CANMET, Canadá (Março 1998)

